

# 修 士 論 文 の 和 文 要 旨

研究科・専攻	大学院 情報理工学研究科 情報ネットワーク専攻 博士前期課程		
氏 名	山崎 貴之	学籍番号	1831164
論 文 題 目	VR を用いた臨場感のあるカーリングシステムの構築		
要 旨			
<p>産業能率大学の行った平昌冬季五輪の競技に関する 1 万人規模のアンケート調査によれば、「関心度が上昇した競技」「自分でもやってみたい競技」においてどちらもカーリングが 1 位という結果が得られている。しかし、国内に通年でカーリングをプレイできる施設は限られた数しかなく、カーリングへの興味は一過性のものとなっている。</p> <p>本研究では VR による没入型デバイスを用いることで、誰でもどこでも比較的容易にカーリングを疑似体験できるシステムの実現を目指す。カーリングのストーンの挙動はわかっていないことが多く、正確な再現は難しい。しかし、近年ようやくストーンのカール（ストーンの曲がる現象）に関する実測データが発表されるようになり、実際のストーンの挙動に近い物理シミュレーションを導入できる可能性が高まっている。</p> <p>提案システムでは実環境にできる限り近づけるために、実際のストーンの実測データを用いてカーリングのカールを再現することで実現していく。具体的には、実測に基づくカール比や軌跡のデータを用いて、それらのデータを Unity 上で計算し、実測データに近づけるための計算式を求めた。また、臨場感を高めるために、ショットの衝突時にエフェクトを加えて、エンタテインメント性も高めた。さらに、2020 年 11 月に完成したばかりの北見アルゴグラフィックスカーリングホールの実環境のデータを用いることで、実際のカーリング場に居るような感覚を体験できるようにした。</p> <p>この提案システムが実際のカーリング体験にどの程度近いかを確かめるために、カーリング経験者にこのシステムを利用させて、評価実験を行った。被験者は、北見工業大学のカーリング部のカーリング経験者 7 名(男 2, 女 5)にシステムを使用させて、評価させた。その結果、没入感や操作性などに関して非常に高い評価が得られた。一方、ストーンの衝突時の挙動に関して一部のプレイヤーから「不自然さを感じる」との指摘が出た。本システムが用意したショットのウェイトが男子トッププレイヤークラスの大きさであったために、被験者が経験したことのないストーンの挙動になってしまっていた可能性がある。元日本代表プレイヤーは不自然さを感じていなかったことから、本システムが実環境に近い臨場感を持ってカーリング体験を実践できるシステムになっていることが示唆された。</p>			

## 令和 2 年度 修士論文

---

# VR を用いた臨場感のあるカーリングシステムの構築

---

学 籍 番 号 1831164

氏 名 山崎 貴之

情報・ネットワーク工学専攻 コンピュータサイエンスコース

主任指導教員 伊藤 毅志 准教授

指導教員 小林 聡 教授

2021/01/25

## 目次

第1章	序論	- 3 -
1.1	本研究の背景	- 3 -
1.2	本論文の構成	- 4 -
第2章	カーリングとデジタルカーリング	- 5 -
2.1	カーリングのルール	- 5 -
2.1.1	フリーガードゾーンルール	- 6 -
2.1.2	カーリングの基本用語	- 6 -
2.2	デジタルカーリング	- 9 -
2.2.1	デジタルカーリングの概要	- 9 -
2.2.2	デジタルカーリングにおける不確定性	- 10 -
2.3	デジタルカーリングの問題点	- 10 -
第3章	関連研究	- 12 -
第4章	VRによる提案システム概要	- 16 -
4.1	制作環境	- 20 -
4.2	VR	- 20 -
4.3	エフェクト	- 21 -
4.4	ストーンのカーリング運動モデル	- 24 -
4.5	カーリング場 3D モデル	- 28 -
第5章	提案システム性能評価	- 30 -
5.1	実験概要	- 30 -
5.1.1	カーリング幅比について	- 30 -
5.2	実験内容	- 30 -
5.3	結果	- 30 -
5.4	考察	- 34 -
第6章	システム体験者評価	- 36 -
6.1	実験手法	- 36 -
6.2	結果	- 42 -
6.3	考察	- 44 -
第7章	結論	- 47 -

謝辞 - 48 -

参考文献 - 49 -

# 第1章 序論

## 1.1 本研究の背景

カーリングは、氷上のチェスと呼ばれるほど高度に戦略性の高いゲームでありながら、科学的な研究は遅れていた。当研究室の北清らによって提唱された「デジタルカーリング」は、コンピュータ上でカーリングのストーンの挙動をシミュレートする試みであり、カーリングの不確定性をコンピュータ上で表現することによって、カーリングの戦略を議論する場を提供し、戦略を競う AI の大会も開かれるようになっていく<sup>[1][2][3]</sup>。

しかし、人間が実際にプレイするカーリングは専用の施設が必要で、国内では北海道や長野など通年でプレイできる場所が数えるほどしかなく、それ以外の地域の人には体験することができないばかりか、カーリングプレイヤも定期的に練習する場所が不足しており、普及において大きな障壁になっている。カーリング場を新規に建設するには、専用の機材を準備する必要があり、10 億円以上の費用がかかり、年間の維持費も数千万円規模が必要であるとされ、非常に大きなコストがかかるという問題もある。

一方、産業能率大学の行った平昌冬季五輪の競技に関する 1 万人規模のアンケート調査によれば、「関心度が上昇した競技」「自分でもやってみたい競技」においてどちらもカーリングが 1 位という結果が得られている<sup>[4]</sup>。女子カーリングチームの活躍も相まって冬季五輪でカーリングが世間で大きな注目を集めていることがわかる。しかし、同じアンケートにおいて、カーリングは 7 割を超える人が「ルールがよくわからないまま観戦した競技」と回答しており、競技に対する理解という点では十分ではないこともわかる。

このように、カーリングに対する興味が高まって、やってみたいと思っても、上述のようにカーリングに直接的に触れることは難しく、カーリングを継続的にプレイすることが困難であるために、カーリングの本質的な楽しさがわからないまま社会的関心が薄れていってしまうという現状がある。カーリングのルールや面白さについて実感を持って伝える手段が求められている。

そこで本研究では当研究室で開発しているコンピュータ上でプレイする「デジタルカーリング」に VR（バーチャルリアリティ）技術を融合させ、カーリングを身近に体験できるシステムとして確立することを目指す。さらに、カーリングの「面白さ」を際立たせることのできるエフェクトを付与することにより、カーリングへの関心を持続させ、競技者や観戦者の裾野を広げて行きたい。その目的達成のためにデジタルカーリングに実体験を持たせ、エンタテインメント性を付与する手法について議論する。

このシステムの有効性を示すためには、以下の 2 つの観点から評価する必要があるだろう。一つは、本システムがどの程度実環境を再現できているかという観点である。これについては、実環境でのカーリング経験のあるプレイヤにこのシステムを体験してもらい、本システムのストーンの挙動がどれだけ実際のストーンの挙動に近いものか、どの程度実際にカーリング場にいる感じが実現できているかを評価させることで確認する。もう一つは、初

心者にとって本システムがどれほど楽しいかという観点である。本システムを使うことで、初心者がカーリングにどの程度興味を持ってもらえるのか、ゲームについての理解がどの程度深まるのかを評価させる。これら 2 つの評価によって提案する VR を用いたカーリングシステムの有効性を調べていきたい。

## **1.2 本論文の構成**

本論文において、第 2 章では、本論文の基礎知識となるカーリングやデジタルカーリングについての説明を行う。第 3 章で関連研究について述べる。第 4 章では提案システムについて説明する。第 5 章では、提案システムの性能について議論を行う。第 6 章では、第 5 章の議論を踏まえた上でのシステム体験者による評価について議論を行う。そして第 7 章では結論を述べる。

## 第2章 カーリングとデジタルカーリング

本章では、本研究で扱うカーリングというスポーツの基本的なルールや用語、当研究室で開発したデジタルカーリングについて説明を行う。

### 2.1 カーリングのルール

カーリングは図 1 のような「シート」と呼ばれる専用の氷のリンクで行われるスポーツである。1 チーム 4 人の 2 チームで行い、各チーム 8 個のストーンを持つ。各チームが交互に「ハウス」と呼ばれるターゲットへストーンを滑らせ、すべてのストーンを投げ終えた時点で得点を計算する。この一連の流れをまとめて 1 エンドと呼ぶ。試合は 8 エンドまたは 10 エンドで行い、総得点で勝敗を決める。

ストーンがプレイ中にリンクに残るためには、ホッグラインからバックラインまでの間に停止しなければならない。また、サイドラインに当たった場合はリンクから除外され、プレイ中に残ることはできない。

またストーンデリバリー時にホッグライン到達前までにストーンを離しておかなければならずこれに違反した場合そのストーンは無効となる。

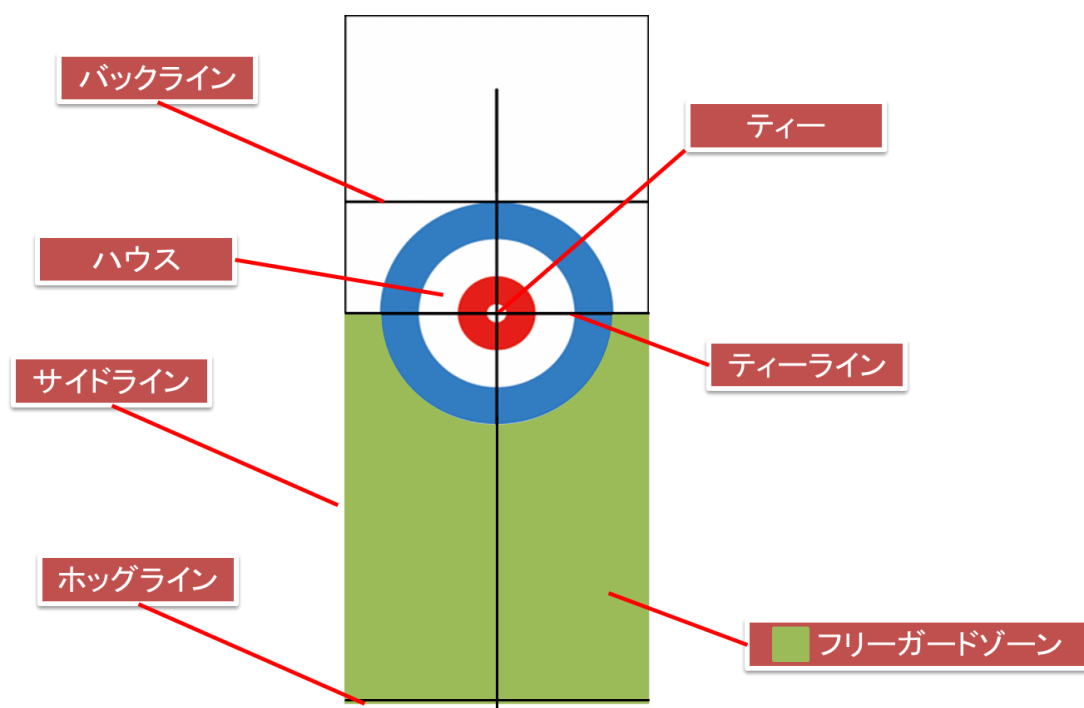


図 2.1 カーリングのリンク(シート)

カーリングは「ティー」と呼ばれるハウスの中央点に最も近いストーンのチームだけが得点できる権利を持つ。1 チームが得点する場合、もう 1 チームの得点は必ず 0 点となる。点

数は、得点しないチームのティーに最も近いストーンよりハウス内にあるティーに近い得点するチームのストーンの数で得点となる。得点の対象となるストーンはストーンの一部がハウスに触れているストーンである。

カーリングの先攻後攻はゲームの最初にドローショットを行い、ティーに近いほうが先後を選択することで決定する。2 エンド目以降は直前のエンドで得点したチームが先攻になる。直前のエンドに両方のチームのストーンがハウス内に残っておらず、どちらのチームも得点しなかったエンドの場合(ブランクエンド)は、先攻後攻を入れ替えずに次のエンドを行う。

### **2.1.1      フリーガードゾーンルール**

カーリングにはフリーガードゾーンルールというルールがある。ティーラインとホッグラインの間のハウスを除いた部分(図1では緑の部分)をフリーガードゾーンと呼ぶ。フリーガードゾーンルールはエンドの第5ストーン(各チームの最初の2投と先攻の3投目)までフリーガードゾーンにある相手のガードストーンを除去することができないというルールである。もしこのルールに違反する場合は、ガードストーンを元に戻し、自分の投げたストーンは除外され次に相手がストーン投げることになる。ただし、自分のストーンを除外することはできる。また、フリーガードゾーンにある相手のストーンをハウス内に押し、次の自分の手番でそのハウス内にある相手のストーンを弾き出すことはできる。

### **2.1.2      カーリングの基本用語**

#### **カーリングの用語**

カーリングの名前の由来となった氷上を滑るストーンが曲がる現象をカールという。ストーンの回転はどの方向にカールするかで決定する。右にカールにするなら時計回りに回転し、左にカールするなら反時計回りに回転する。回転がない状態の場合は、ランダムな回転になり予測不可能なコースとなってしまう。

ハウス内でティーに最も近いストーンのことを No.1 ストーン(ショットロックとも)と呼び、2番目に近いストーンのことを No.2 ストーンと呼ぶ。

#### **ショット(デリバリー)**

カーリングのショットは大きく、ドローショットとヒットショットの2種類に分類される。ドローショットはリンクのプレイリア内にストーンを停止させ、配置するショットのことを指し、ヒットショットは配置されているストーンをプレイリア外に除外するショットのことを指す。



## **ウェイト**

ショットの強さのことで、ストーン速度の速いショットのことをヘビーウェイト、逆に遅いショットのことをライトウェイトと呼ぶ。

## **スweep**

ブラシによってリンクに張られた氷をこすることでストーンの速度やベクトルを調整する作業のことを言う。このスweepによってストーンの挙動が変化するため、先述のショットに失敗してもスweepで失敗を修正することが可能である。

## **カール**

先述したストーンが曲がる現象のことである。この現象は過去に様々な理論が提唱されたが、現在も完全に説明できる物理モデルが定義できていない。しかし近年の研究によりカールの要因となる事柄が判明し、カール現象解明が進んでいる。

## **ターゲットハウス(スターティングハウス)**

同心円の部分をハウスと呼び、プレイヤーはこのハウスの中心にストーンを投球する。投球する側のハウスをスターティングハウスといい、その反対側のハウスをターゲットハウスと呼ぶ。

## **ホッグライン**

ハウスの前にあるラインのこと。

## **ターン**

ストーンの回転のこと。

## **ストーン**

カーリングで投げる石のことで花崗岩などの石が原材料となっている。このストーンごとに滑りやすさなどが変化する。

## **ペブル**

氷の表面の細かい粒のこと。シート内のペブル管で湯や水を撒くことによって生成される。

## **ブラシ**

ストーンの進路などを擦るための用具のこと。

### シート(リンク)

カーリングに使用するために整備された氷のこと。

### エンド

各チーム 8 投ずつ 1 セットで 1 エンドとなる。1 試合通常 10 エンド行う。

### ガード

味方のストーンを場外へはじかれないようにフリーガードゾーンに配置するストーンのこと。

### ショットロック

ハウスの中心(ティー)に最も近いストーンのこと。

カーリングは審判が存在しないセルフジャッジのスポーツである。そのためカーリングには紳士的な精神が求められ、遵守すべき礼儀が存在する。以下にそのマナーを列挙する。

- ✧ ストーンに触れてしまったなど、例え誰にも気付かれなくとも何らかのミスを犯した時は速やかに自己申告する。
- ✧ 相手のプレイを妨げるような行為(相手ターンに大声を出すなど)をしてはならない。
- ✧ ゲームの途中でも勝ち目が無いと判断した時は潔く負けを認め、降参する。
- ✧ 相手のミスを喜ぶような態度を示すことはしてはならない。
- ✧ カーリングリンクは手間をかけてベブルが作られ、その状態によってショットの軌道に影響する。そのため故意に傷をつけたり、ストーンを投げた後に手をついたりしてはならない。
- ✧ 時間制限が設けられていない試合でも、投球時に時間をかけ過ぎるような遅延行為をしてはならない。
- ✧ 勝ったチームがシートの掃除を行う。

このようにカーリングは技術や知力、体力を駆使して競う競技であるとともに、対戦相手を最大限に尊重する礼儀を重んじるスポーツである。なお本研究のシステムでは規則違反を自己申告ではなく完全にシステム上で処理している。

## 2.2 デジタルカーリング

ここでは、北清らが開発したコンピュータ上でカーリングを行う「デジタルカーリング」について説明する。

### 2.2.1 デジタルカーリングの概要

デジタルカーリングはコンピュータ上でカーリングというゲームをシミュレートし、戦略に応じて手を入力するシステム同士の対戦を可能にする場を提供している[北清 2014]。

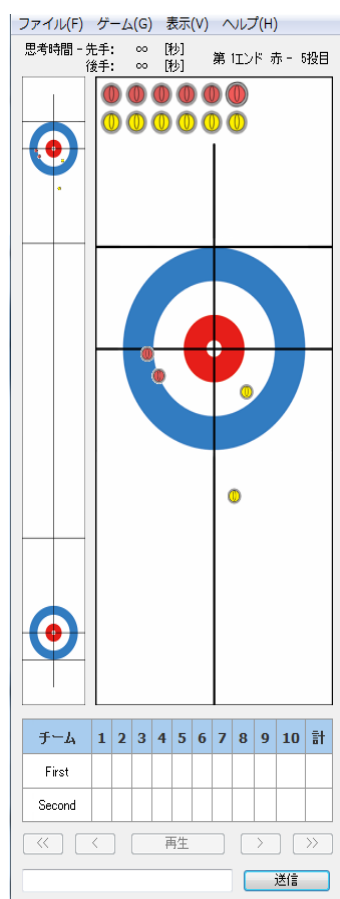


図 2.2 デジタルカーリングの画面

図 2.2 はデジタルカーリングの動作画面である。システムはクライアント・サーバー型をしており、シミュレータを備えたサーバーに AI もしくは人間がクライアントとして接続す

ることで、対戦進行することができる。デジタルカーリングでは理想のリンクコンディションを再現しており、リンク全体の摩擦係数は一定である。また、氷をブルームと呼ばれるブラシで擦るスイープの機能はない。スイーピングはショットのミスを微修正することが主な目的であるため、それも含めてショットの正確さを乱数で表現している。なお、デジタルカーリング上のストーンの動きは物理シミュレータのライブラリである Box2D<sup>1</sup>を使用している。

### 2.2.2 デジタルカーリングにおける不確定性

実際のカーリングでは、どんなに優れた選手でも完全に正確な位置にストーンを投げることが困難である。デジタルカーリングでは、このような不確定性を課題として扱うために、ショットに乱数を加えることで不確定性を実現している。

乱数は正規分布に従う形で生成され、ショットの初速度ベクトルの  $x$  軸方向、 $y$  軸方向それぞれに対して乱数の値を加えられている。標準偏差はショットの強さや場所に関係なく一定である。この乱数によって、デジタルカーリングでは同じショットを選択しても結果が一意にならないようになっている。

## 2.3 デジタルカーリングの問題点

当研究室で開発されたデジタルカーリングシステムはカーリングの戦略を議論する機会を提供するツールであり、コンピュータ上でカーリングをプレイ可能なシステムであるが、AI 開発者向けに戦略を議論する側面が強いソフトであるため、ストーンの挙動は非常にシンプルな物理法則に基づいており、実環境のストーンの挙動とは若干異なっている。そもそも、開発当時には氷上におけるストーンの挙動の正確なデータがなかったため、カールと呼ばれる現象も正確に表現されていない。

カールを再現するためのモデルは、ストーンのあるステップにおける速度ベクトルに対して、垂直方向の定数ベクトルの力が加わるものとしてストーンの動きをモデリングしている[5]。定数ベクトルが加わることにより速度ベクトルが増大するため、摩擦による減速を考慮して速度ベクトルの調整を行う。以下に計算の手順を示す。

図 2.3 のように、あるステップにおけるストーンの速度ベクトルを  $\mathbf{v}$ 、ストーンと氷の摩擦力を  $\mathbf{a}$ 、垂直の力を  $\mathbf{b}$  とする。まず減速のために速度ベクトル  $\mathbf{v}$  から  $\mathbf{a}$  を引く。このベクトルに対して垂直方向のベクトル  $\mathbf{b}$  を合成する。すると図 2.4 のように速度ベクトルの大きさが  $|\sqrt{(\mathbf{v} - \mathbf{a})^2 + \mathbf{b}^2}|$  となる。しかしストーンの速度は  $|\mathbf{v} - \mathbf{a}|$  であるため、図 2.5 のようにもとの大きさを調整する。このベクトルをシミュレーションの次のステップにおける速度ベクトルとし、これを  $|\mathbf{v}| \leq 0$  となる、すなわちストーンが停止するまで繰り返すこ

---

<sup>1</sup> Box2D <<http://box2d.org/>>

とでシミュレーションを行う．このような形でカーリングシミュレーションモデルが実装されていた．

しかし，この計算方法によるシミュレータではカーリング経験者からカーリングがやや弱く現実的な挙動とは違うのではないかという指摘がされていた．改良を試みようとしても，当時はカーリングストーンがどのように挙動するのかという実測データが不足していたため，どのように改良してよいのかがわからずに長い間改良できずにいた．

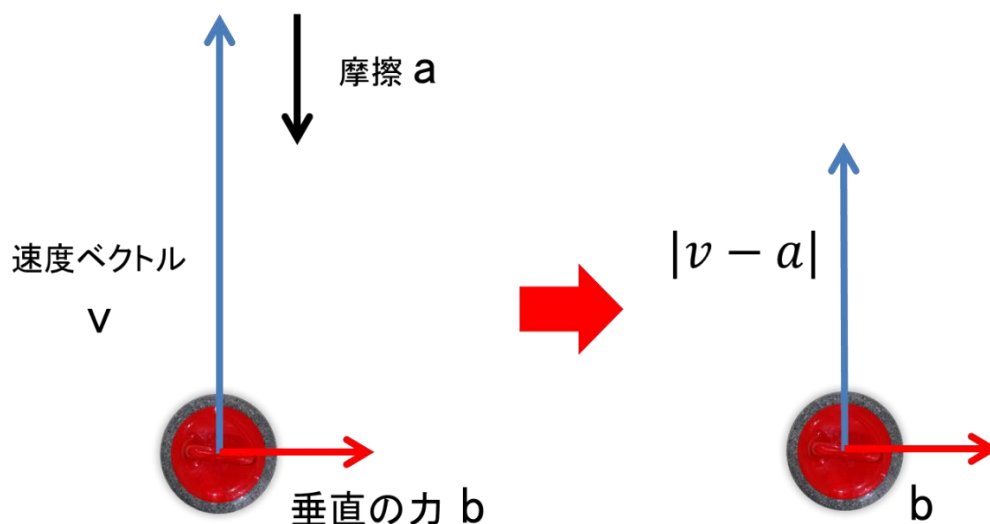


図 2.3 ショットベクトル計算図 1

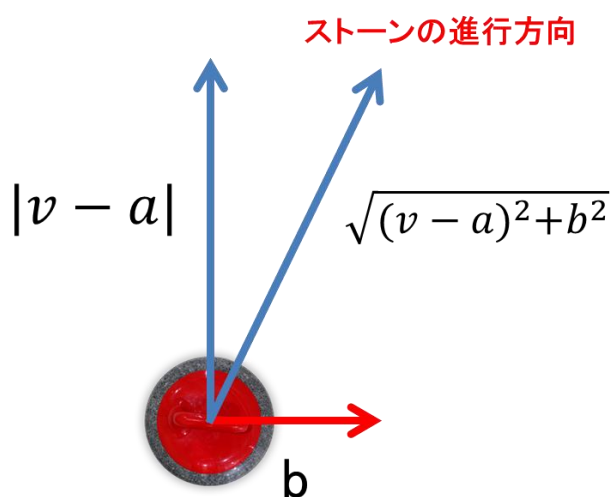


図 2.4 ショットベクトル計算図 2

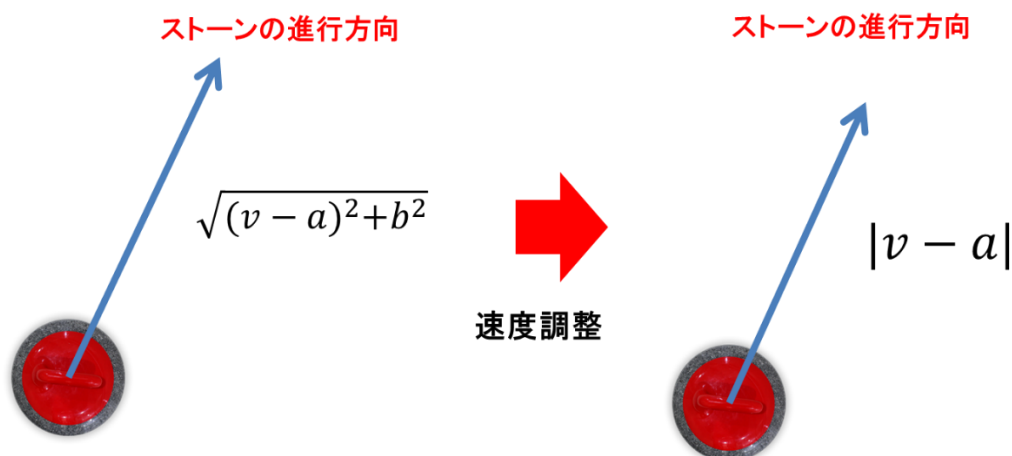


図 2.5 ショットベクトル計算図 3

### 第3章 関連研究

ここではカーリングのストーンの挙動に関する研究と VR を用いたシステムの有効性に関する研究について述べる。

カーリングの名前の由来となっているカールという現象の原理は現在も未解明であるため、カーリングにおけるストーンの厳密な運動モデルは今なお定義されていない。また既存の研究ではストーンの運動に関する精密な観測が行われた研究は少ない。その中で氷上を進むストーンの位置座標を測定し、得られたデータの解析結果としてまとめた研究がいくつか存在する [6][7][8]。

これらの研究では氷上を進むストーン運動の詳細を明らかにするために、様々な精密測定を行っており、ストーンの底面の形状と曲がり幅の関係を調べている。これらの実験ではストーンは通常カーリングで用いられているものとこの実験のために用意した底面がなめらかな特殊なストーンが用いられている。この実験の結果、カーリングストーンの底面がなめらかなストーンの方は実際に競技で使用されているストーンよりもカール幅が非常に小さくなることが判明した。このことから、カーリングストーンのランニングバンドと呼ばれるストーンとリンクが接する部分の表面の粗さとその面積がカール現象の主な原因であるという説を唱えている。この結果は従来カール幅が氷の表面の温度や湿度などに影響されているという経験則を覆す結果であった。

また、VR が初心者学習に与える影響に関する研究について紹介する。一つは VR による生体学的学習である [9]。この研究では、理数系の学習において没入型仮想現実デバイス (VR) を用いる学習と従来のスライドショー形式の学習を比較して VR の学習における効果を検証する実験を行った。その結果として従来のパワポを用いたスライドショー形式の学習を行った生徒は VR で学習した生徒よりも成績は良かったものの、教科に対する動機付けや興味関心については VR の生徒のほうが高いという結果が得られた。この実験結果

から学習において興味、関心を増大させるのに VR による学習が効果的だと結論付けた。具体的には、被験者として 55 人の大学生を用意し、それぞれ VR での学習を行うグループとスライド(パワポ)での学習を行うグループに分け習熟度の比較を行った。講義の内容は人体の血流についてのもので VR では The Body VR という教材を用いた。この教材は血管の中を旅し、赤血球などの細胞についての解説を交えながら実際にその細胞の働くアニメーションを没入的に見ることができるものである。またその様子を 360 度見まわして観察することができる。実験前に被験者に対して事前にテストとアンケートを実施し、学習後にもテストとアンケートを実施した。事前アンケートでは高校や大学での受講した理数系科目や人体に関する知識量について回答してもらった。実験後のアンケートでは当方が設定した質問に対して 7 段階での評価と自由記述のアンケートを実施した。また実験後のテストは 16 問の知識問題と 4 問の記述形式の問題を出題した。VR 装置は HTC Vive(Oculus Rift と同等のスペック)を使用した。また別の被験者を 57 人集め、そのうちの半分の被験者に VR での学習を前者のグループが一貫して行ったのに対して、このグループでは各章ごとに VR ゴーグルを外しその章の要約を書かせることにした。このグループのアンケートにはゴーグルを外すことによるわずらわしさ度合をアンケートで回答してもらった。その結果、スライドショーグループの平均スコアは 13.54 ポイントで、VR グループの 10.17 ポイントよりも有意に良いスコアとなった。特に知識を問う問題では VR の平均スコアが 7.74 なのに対し、スライドショーでは 11.00 という結果となった。これにより知識を伝達するにはスライドショーのほうが有利であると考えられる。一方で受講した講義に対しての被験者の興味・関心度合を精査した結果、講義が退屈であったかどうかという問いにおいて VR グループでは 1.81 ポイントであったのに対してスライドショーグループでは 4.25 ポイントと圧倒的に VR による講義のほうが興味・関心を持たせることに適していることが判明した。また VR 学習の途中で各章の要約を行ったグループのテスト結果は 13.83 ポイントでスライドショー形式の学習を行ったグループのスコアと遜色ない結果となった。これらの結果から VR のみではなく VR での学習後に学生らに知識を体系的にまとめさせることで、その受講科目への興味・関心を維持させたまま高い学習成果を上げることができる結論付けた。

また、VR を消防ヘリ訓練に応用した研究もある<sup>[10]</sup>。山火事の消防訓練は、現実の世界において費用と環境負荷の問題から効果的な訓練の主な障壁となっている。VR やシミュレータは実際に経験せずに取得することは困難である重要なスキルを習得するためのトレーニングの機会を提供することが可能である。その中でも状況認識 (Situation Awareness 以下 SA) は、航空的視野(AAS)の重要な側面である。機上で収集された情報に基づいて、目標を的確に決定する必要がある。この研究では消防ヘリの消火活動における SA を訓練するためのシステムとしてバーチャルリアリティトレーニングシステムの比較を行った。この研究で使用するディスプレイのタイプは、視野や仮想環境およびシステム内の存在などの要因により、さまざまなレベルの SA を提供することが可能である。

SA の取得と 3 つのディスプレイタイプの没入感を評価するために、36 人の参加者を対象に調査を実施した。実験装置は高精細テレビ (HDTV)、Oculus Rift 製ヘッドマウントディスプレイ (HMD)、および 270° 円筒型投影システム (SimPit) を用いた。その結果 HMD と HDTV の間と同様に、SimPit と HDTV の間にも SA レベルに大きな違いがあることが判明した。HMD の方が没入性と携帯性や費用対効果が優れており、SimPit は実際の環境を提供することが適していたと結論付けた。

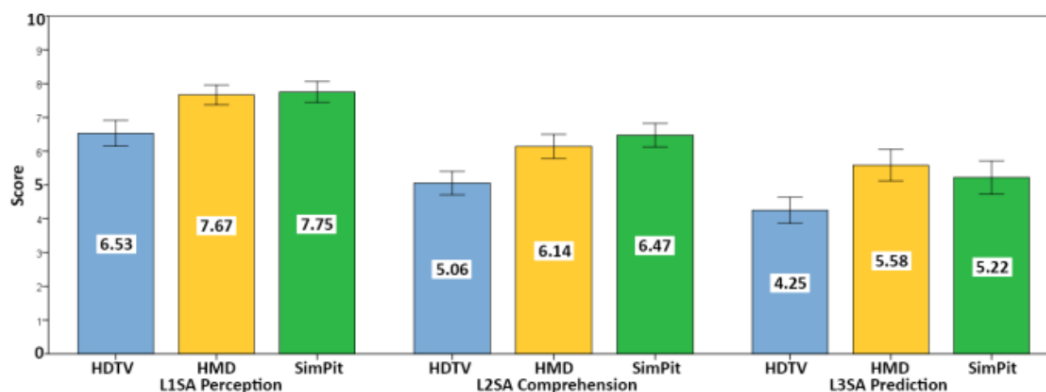


図 3.1 Graphs showing results of Situation Awareness ability, Perception (L), Comprehension (M) and Prediction (R)<sup>[9]</sup>

災害の状況を 3 段階の難易度別に感知、理解、予測の能力判定試験を前述のそれぞれのシステムにおいて学習した後、テストを行った際の結果を比較した。図 3.1 はテスト結果を表している。その結果没入型のシステムである Sim Pit と HMD(VR)では被験者にとって災害の状況がより把握しやすくなり、学習効率向上に貢献したことが示された。

さらに、VR をスキーの学習に応用した研究も挙げる<sup>[11]</sup>。近年健康目的によるスキーエクササイズゲームが人気となっている。従来の研究ではこのゲームの効果を評価するにあたり運動能力についての項目のみが注視され、集中力を評価対象から除外していた。そこでこの研究では運動能力のみならず集中力にも着目し、VR とスキーの動作のためのモーションプラットフォームを融合させたシステムにおいて、ユーザに対しどの程度運動能力と集中力に寄与するか評価実験を行った。この研究の目的は VR の有無でユーザの運動能力と集中力に与える影響を評価することである。運動能力を測定するにあたり足首の可動域 (ROM) と定格知覚労作 (RPE) を用いた。またユーザの集中力を評価するために脳波 (EEG) を使用した。その結果足首の ROM は VR 運動と非 VR 運動でそれぞれ 115.71° と 78.50° であった。また RPE では、統計的に有意な差がみられなかった。一方で EEG において集中力の高さに関連する SMR wave の値が VR を装着した状態で測定したものが 3.08% と非 VR の 2.7% よりも明確に高いことが分かった。これにより VR によって集中力が増加したと考えられる。以上の結果により、この VR スキーエクササイズは、運動は好きではないがゲームを楽しむ人にとって効果的なシステムであると結論付けた。



これらの論文から、カーリングというスポーツを体験する機会が少ない現状を克服するためには、実環境を再現した VR によるカーリングシステムは効果的な手法である可能性がある。なぜなら、VR 自体が実際のカーリング場を建てるよりも安価に実現できるばかりか、VR が初学者にとって興味を高める手段になる可能性があるからである。本研究では、実環境に近い VR のカーリングシステムを試作して、これらの効果を確認していきたい。

## 第4章 VRによる提案システム概要

VRによる臨場感の再現を目的とするシステムの概要をここでは述べる.

このVRカーリングシステムは1.実環境の再現 2.エフェクトによる可視化及び強意 3.没入感と臨場感の提供を柱に開発を行った. 以下にその概要を示す.

### 1. 実環境の再現を目的

- 近似的カール幅比
  - 実測データに基づいたカーリングストーンの挙動を再現

### 2. 強調と可視化を目的

- Sound Effect
  - ストーンの生死を効果音で分かり易く
- Visual Effect
  - 規則違反への警告, 目標座標の表示, ストーン軌跡の表示

### 3. 臨場感と没入感の実現を目的

- Sound Effect
  - ストーンの衝突音などの環境音とプレイヤーの掛け声
- Visual
  - 精細なカーリング場やストーンの3Dモデル, プレイヤモデルで臨場感を演出
- VR(没入感)
  - HMDによる没入型インターフェースにより臨場感の向上
- 現実的なストーンの挙動再現
  - カーリング最大の特徴である事象を再現
- 自由度の高いカメラ
  - カーリングを多視点で体験可能

実環境の再現において近似的にカール幅比を実測データに基づいて表現する, カール幅比とはカーリングストーンがターゲットハウス方向への移動量に対してサイドライン方向へのどの程度移動したかを示す比である. 現在精密なカール現象を再現する物理モデルが定義されていないため, 本システムでは近似的なカール幅比の式を用いてカール現象を再現する.

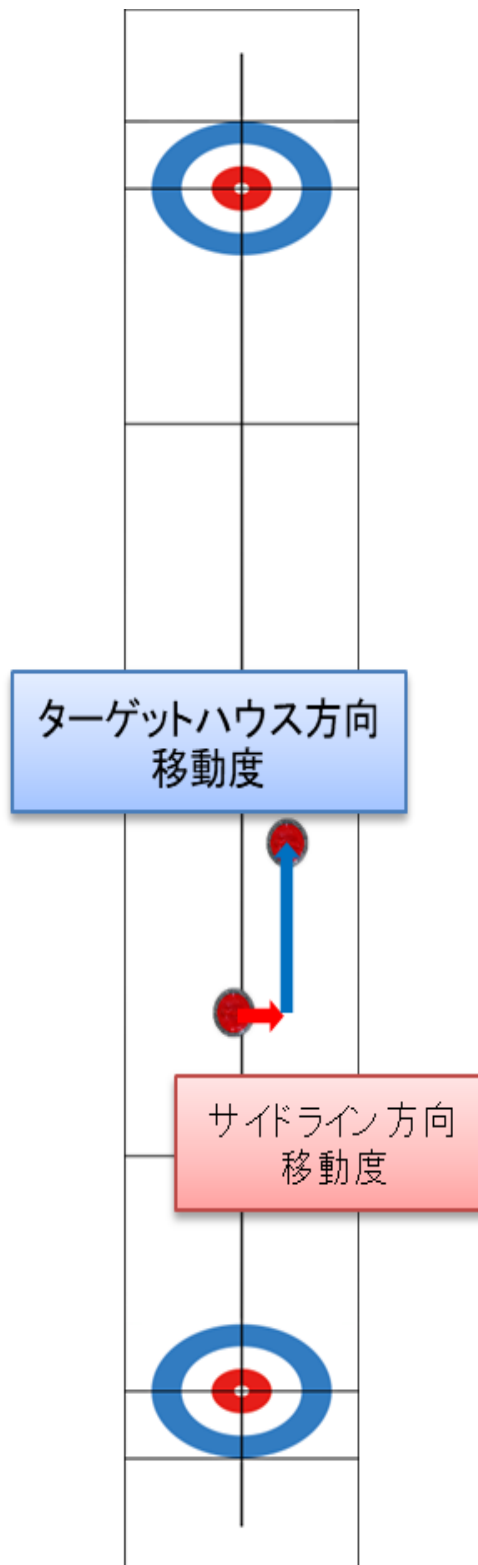


図 4.1 カール幅比図

次に図 4.2 に提案システムの処理の概要を示す。



図 4.2 提案システム概要図

この提案システムはゲーム状況の理解補助や臨場感向上のためのエフェクトシステム、実環境に近いカーリングシートの再現したシミュレータ、カーリング場内を自由に移動可能とすることで臨場感を実現のための一人称 VR カメラシステムのこれら 3 つを組み合わせている。このシステムは Unity 上において作成を行った。

図 4.3 にシステムの VR モードでの操作画面を示す。このシステムでは操作者の視線にレティクル(照準)を装備している、このレティクルを基準としてストーンをデリバリーしたい座標に視線を合わせることでショットの位置を決定することができる設計になっている。また通常のディスプレイでも利用可能となっている。

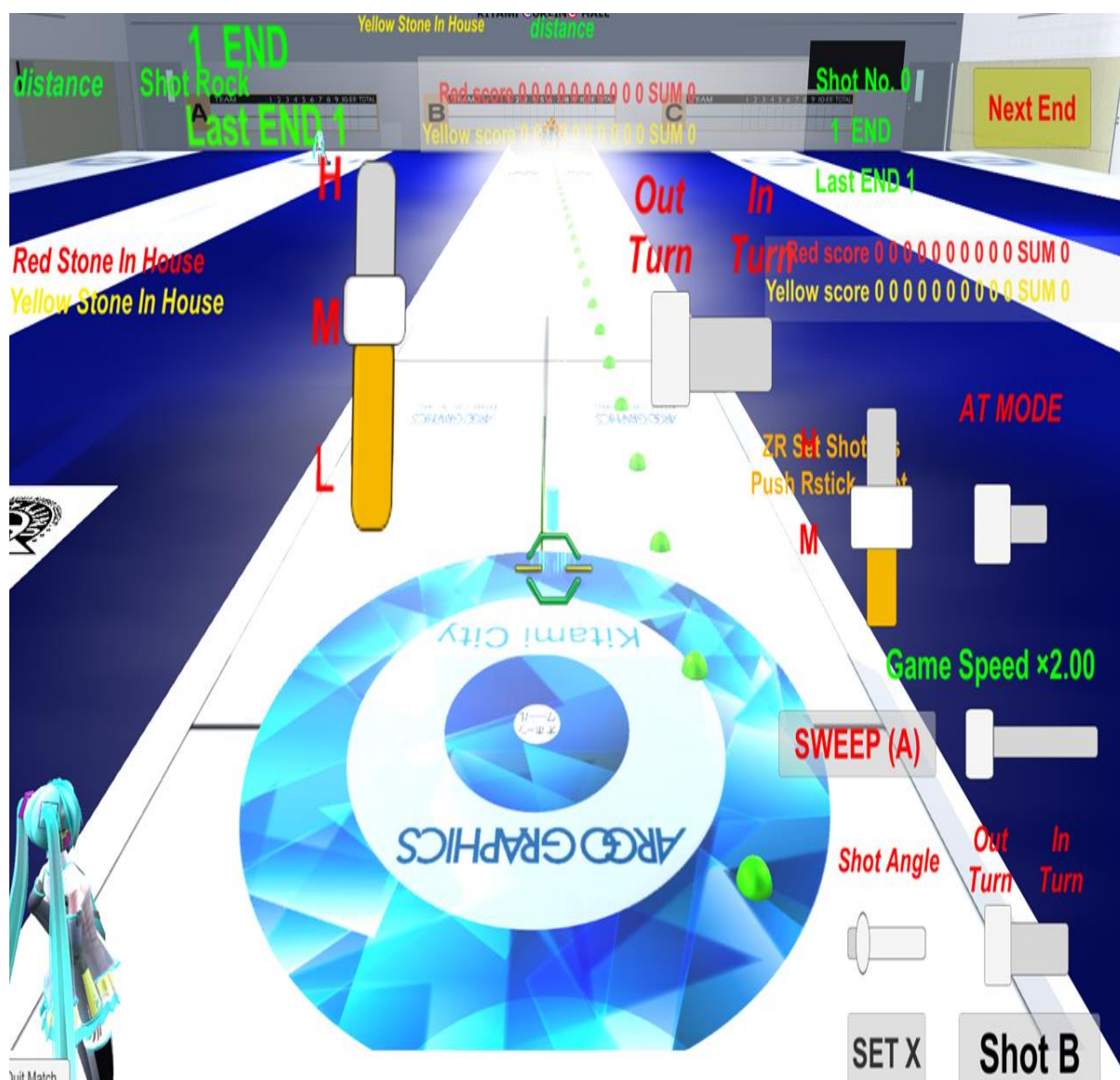


図 4.3 VR モード操作画面 1

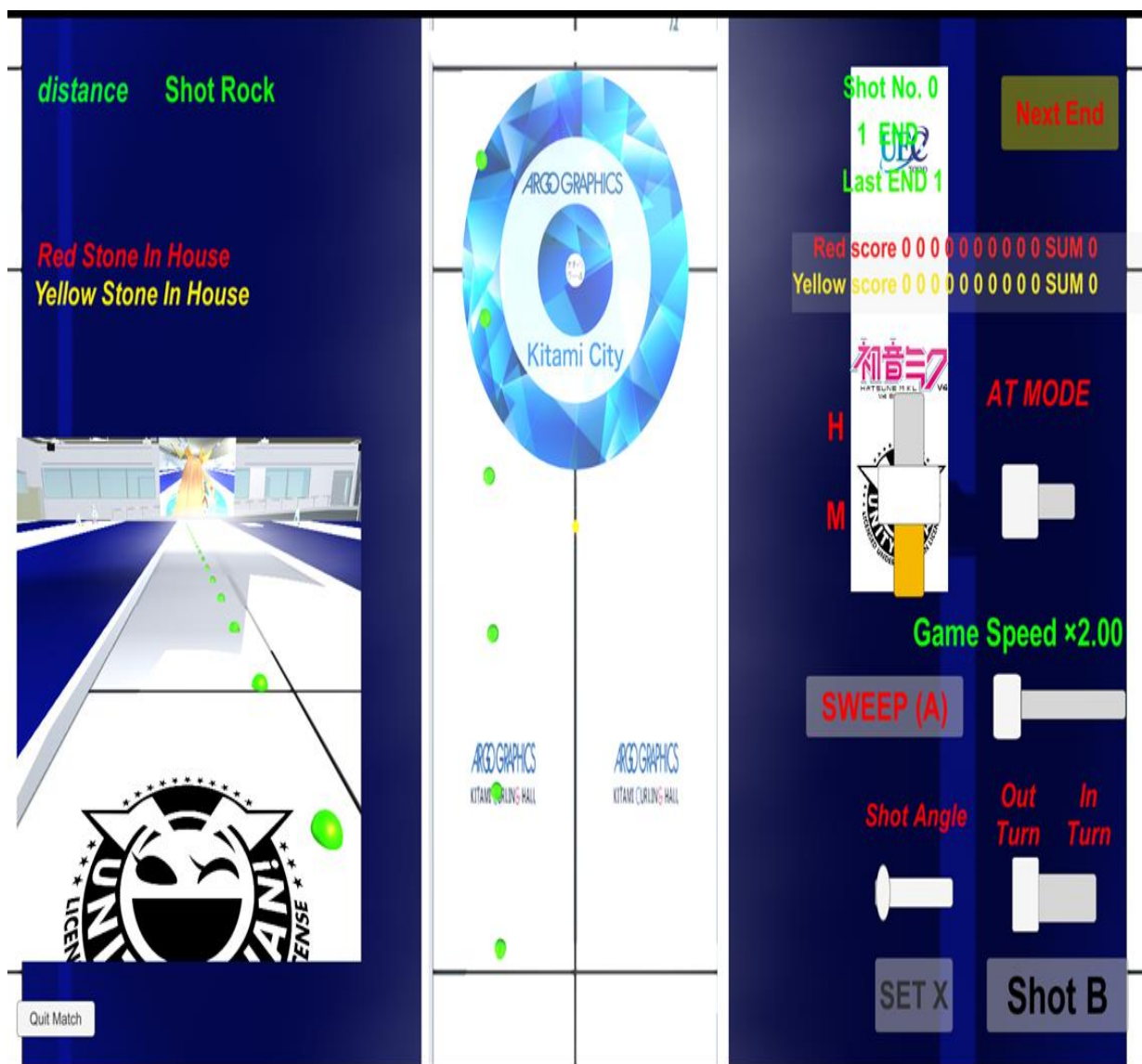


図 4.4 VR モード操作画面 2

## 4.1 制作環境

システム作成にあたりゲームエンジンである Unity<sup>2</sup> を採用した。開発バージョンは Unity 2019.4.11f1 である。

## 4.2 VR

ヘッドマウントディスプレイとして Oculus Rift S<sup>3</sup>を採用した。

<sup>2</sup> <https://unity.com/ja>

<sup>3</sup> <https://www.oculus.com/rift-s>

### 4.3 エフェクト

ビジュアルエフェクト，サウンドエフェクトを付与することで臨場感の向上およびルールの可視化を実現する．このとき臨場感や没入感の向上を目的とするものとカーリングのルールの可視化や強調を目的とするものが存在する．図 4.5 のように 5 ロックルールに違反した場合警告音とそのメッセージを表示して使用者に注意を促すものや図 4.6 のように見た目を華美にするエフェクトや図 4.7 にあるような盤面状況の提示を目的としたエフェクトを実装している．またストーンの滑る音や衝突音，カーリング場内の音もサウンドエフェクトとして実装している．



図 4.5 ルール違反表示エフェクト



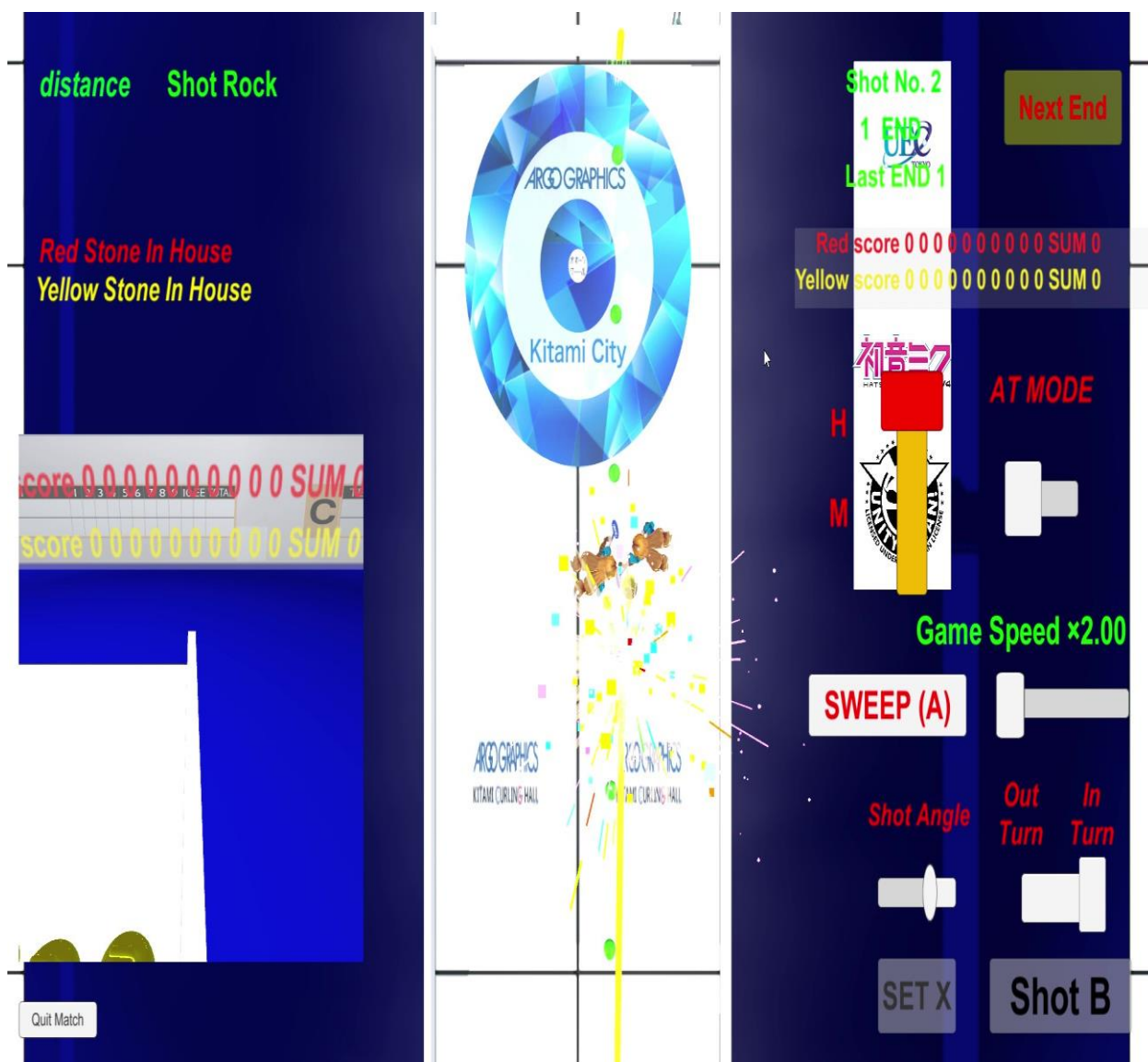


図 4.6 ストーン衝突エフェクト



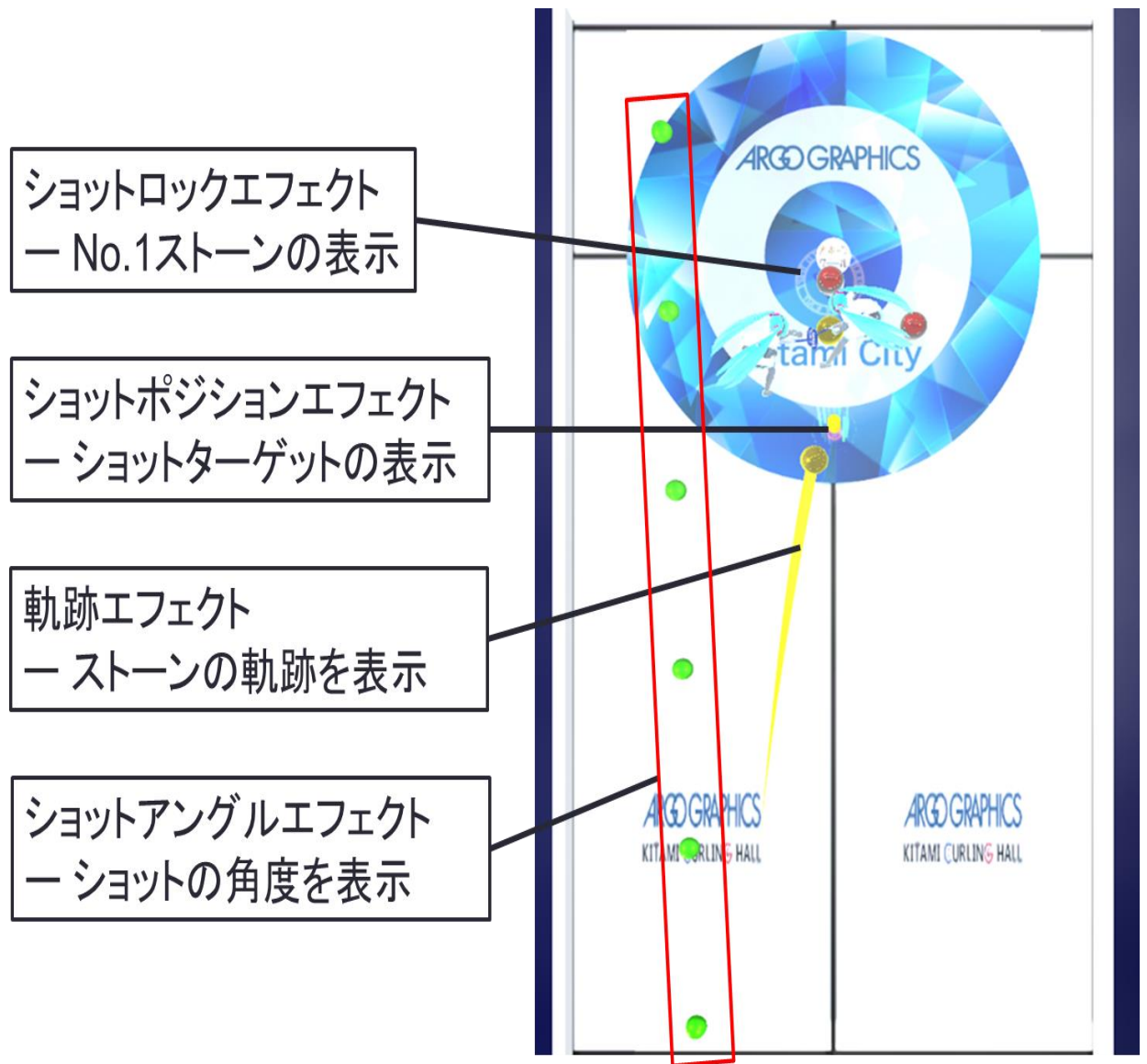


図 4.7 その他エフェクト一覧

## 4.4 ストーンのカール運動モデル

ここではストーンのカール現象を近似的に再現したモデルについて議論する。  
そしてこのカール運動再現モデル式を VR カーリングに組み込むことで臨場感の向上を図る。

以下に関連研究で得られた結果を図 4.8 および図 4.9 に示す。

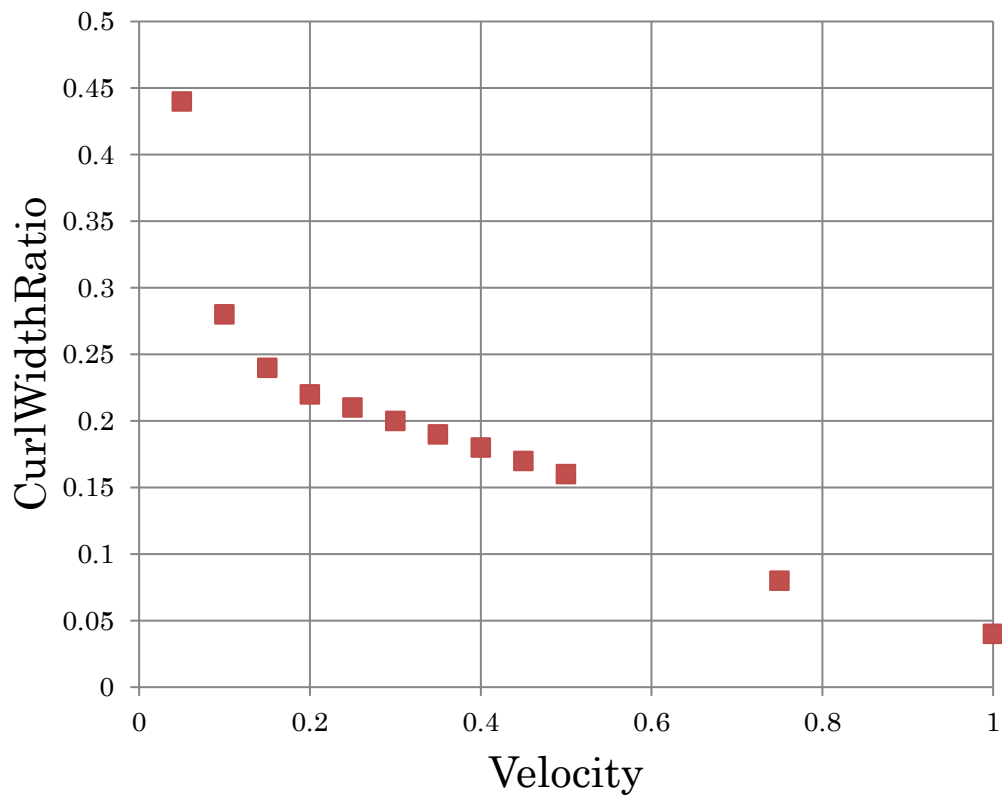


図 4.8 実測によるカール幅比

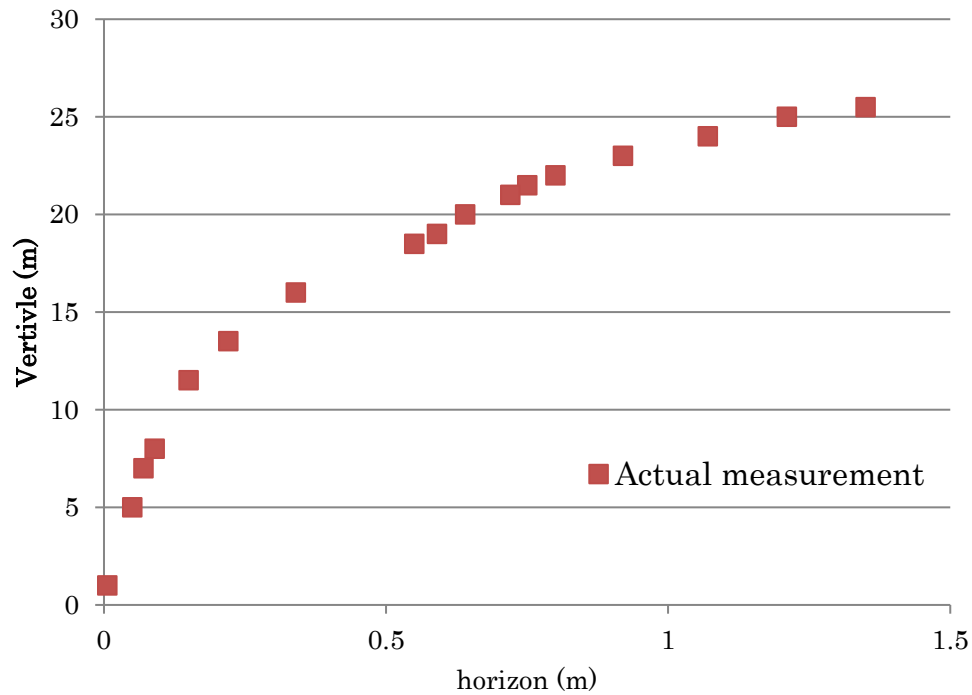


図 4.9 実測によるカールの軌跡

この図 4.1 より近似式を算出したところ式 4.1 が得られた.

$$\text{CurlWidthRatio} = -0.114 \cdot \text{Log}_{10}x + 0.4$$

式4.1 実測カール幅比近似式

このカール幅比の近似式とニュートン運動方程式より

$$ma = F$$

式4.2 ニュートン運動方程式

ストーンの進行方向速度を $v_{y+x}(t)$ , カール方向への速度を $v_x(t)$ とおく. このとき実測によって得られたカール幅比データから算出した近似式より

$$\text{CurlWidthRatio(CWR)} = \frac{v_x}{v_{y+x}} = -0.114 \cdot \log_{10}v_{y+x} + 0.4$$

式4.3 カール幅比近似式

カール方向に対しての運動方程式は

$$m \frac{dv_x(t)}{dt} = F$$

$$m \frac{dv_{y+x}(t)CWR}{dt} = F$$

式4.4 カール率近似式代入後の運動方程式

$$m \frac{d}{dt} v_{y+x}(t) \cdot (-0.114 \cdot \log_{10} v_{y+x}(t) + 0.4) = F$$

式4.5 Unity におけるカール再現のためのモデル式

この結果によりカール再現のための外力付与モデル式を式 4.6 と導出した

$$F = \frac{x(-0.114 \cdot \text{Log}_{10}x + 0.4)}{K}$$

式4.6 カール再現のための外力付与モデル式

$$K = \begin{cases} 1.20, & 0.4 < \text{Velocity} < 1.0 \\ 1.05, & 0.075 < \text{Velocity} \leq 0.4 \\ 0.25, & 0 < \text{Velocity} \leq 0.075 \end{cases}$$

式4.7 カール再現のための外力付与モデル式の係数

このモデル式を用いて図 4.10 のように一定時間ごとにカール方向へ  $F$  の力を加えることでカールの再現を試みた。この  $F$  はストーンの速度に応じて変化しており、Unity の標準機能の一つである `FixedUpdate` と呼ばれる物体の運動を制御する関数内に実装している。この関数は 0.02 秒ごとに呼び出されメソッドを実行することができる。すなわちこのカール表現のための外力  $F$  は 0.02 秒単位でストーンの運動を制御している。

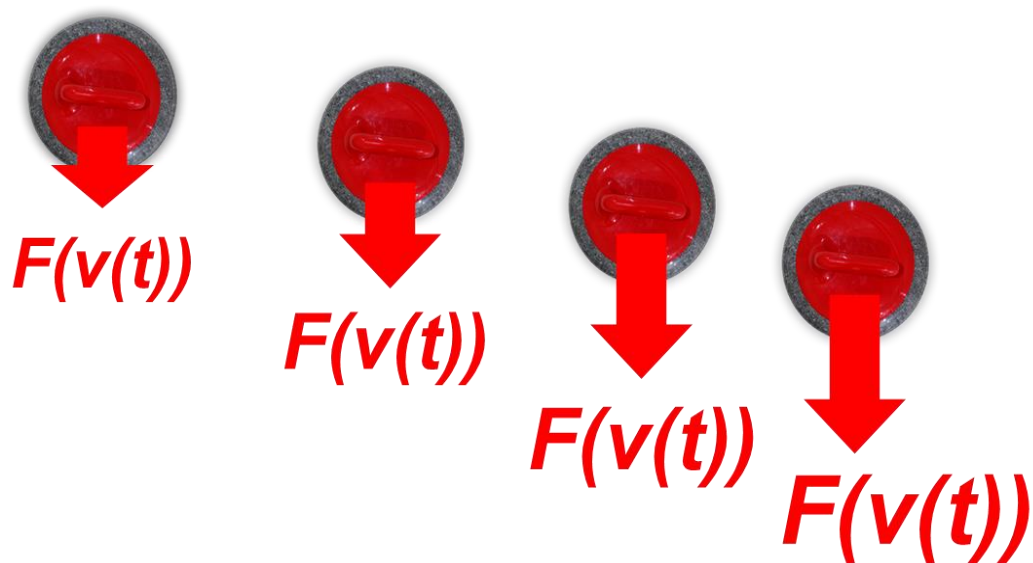


図 4.10 ストーンのカール再現概要図

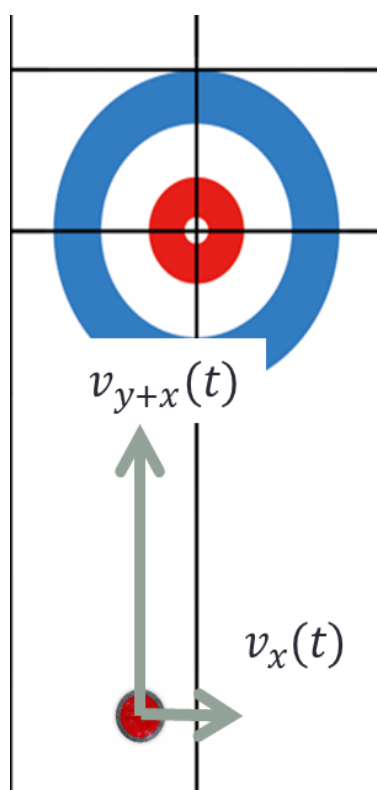


図 4.11 カーリングストーン運動図

5 章でこのカール運動モデル式による計測結果と実測によるデータを比較しモデルの妥当性の確認および考察を行う。

#### 4.5 カーリング場 3D モデル

アルゴグラフィックス北見カーリング場を再現した精巧なカーリング場 3D モデルを図 4.11 に、実際のカーリング場を図 4.12 に示す. この 3D モデルによって臨場感の向上に寄与すると考えている.

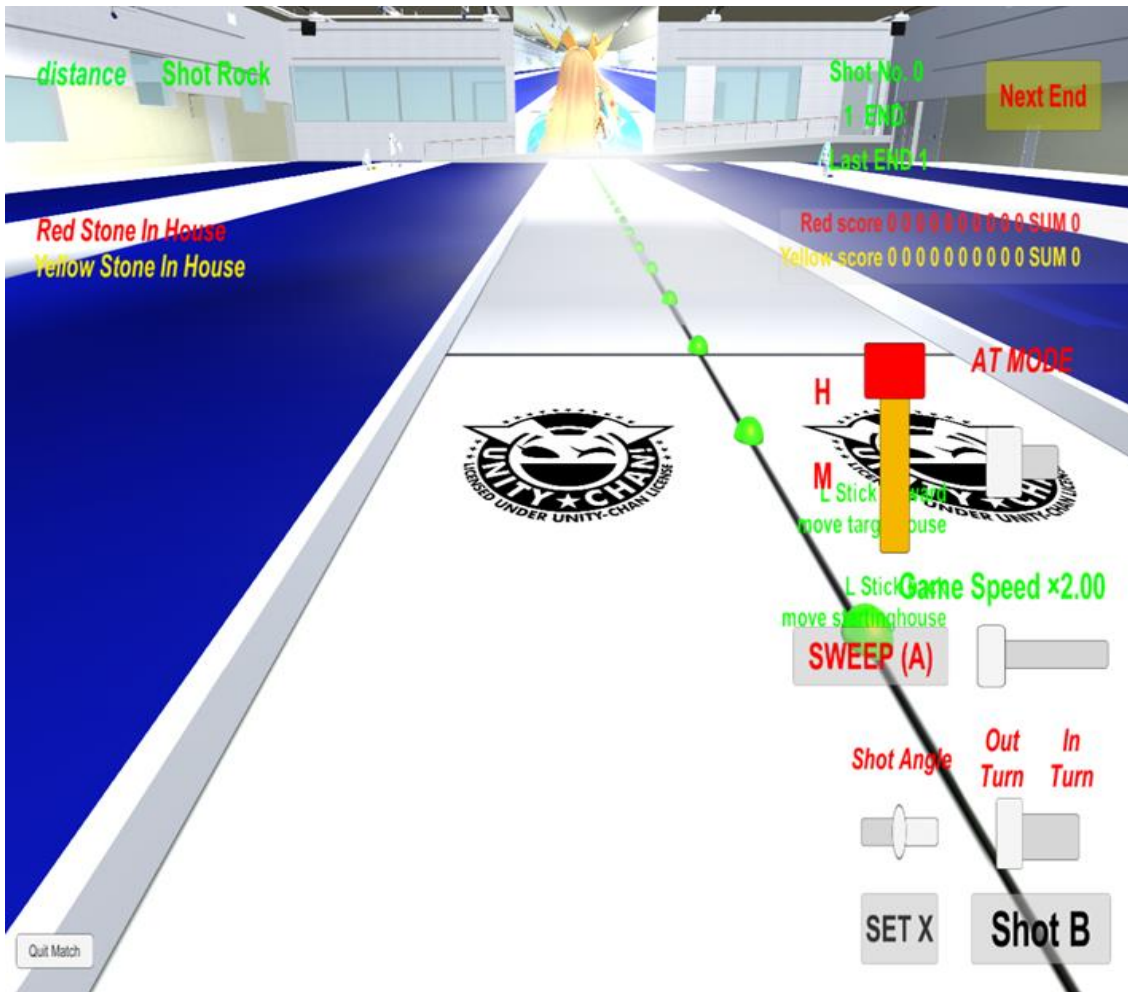


図 4.12 アルゴグラフィックス北見 3D モデル



図 4.13 実際のアルゴグラフィックス北見カーリング

## 第5章 提案システム性能評価

### 5.1 実験概要

本研究では、臨場感を有するカーリングシステムを提案しているが、臨場感の演出においてここではカール運動の再現に注目して議論する。

#### 5.1.1 カール幅比について

4.4において得られたストーンのカール運動モデルを用いて Unity で実装を行った。カール幅比とストーンの軌跡においてこのモデルによるデータと実測によるデータを比較し、どの程度一致しているか計測を行った。

### 5.2 実験内容

本研究では VR 機器による没入型デバイスを用いることで、カーリングを臨場感のあるシステムの実現を目指す。この提案システムでは実環境にできる限り近づけるために、臨場感のある 3D カーリング場において、ストーンを滑らせたり、カーリング場の中を自由に移動できたりするようになっている。ここでは、このシステムのカール幅比や軌跡のデータを Unity 上で計測し、実測データとの比較を行うことで、本システムによってどれだけ実環境に近いリンクが実現できたかを検証することを目的とする。

### 5.3 結果

Unity で計測したデータと実測によるデータを比較したグラフを以下の図 5.1, 図 5.2 に示す。



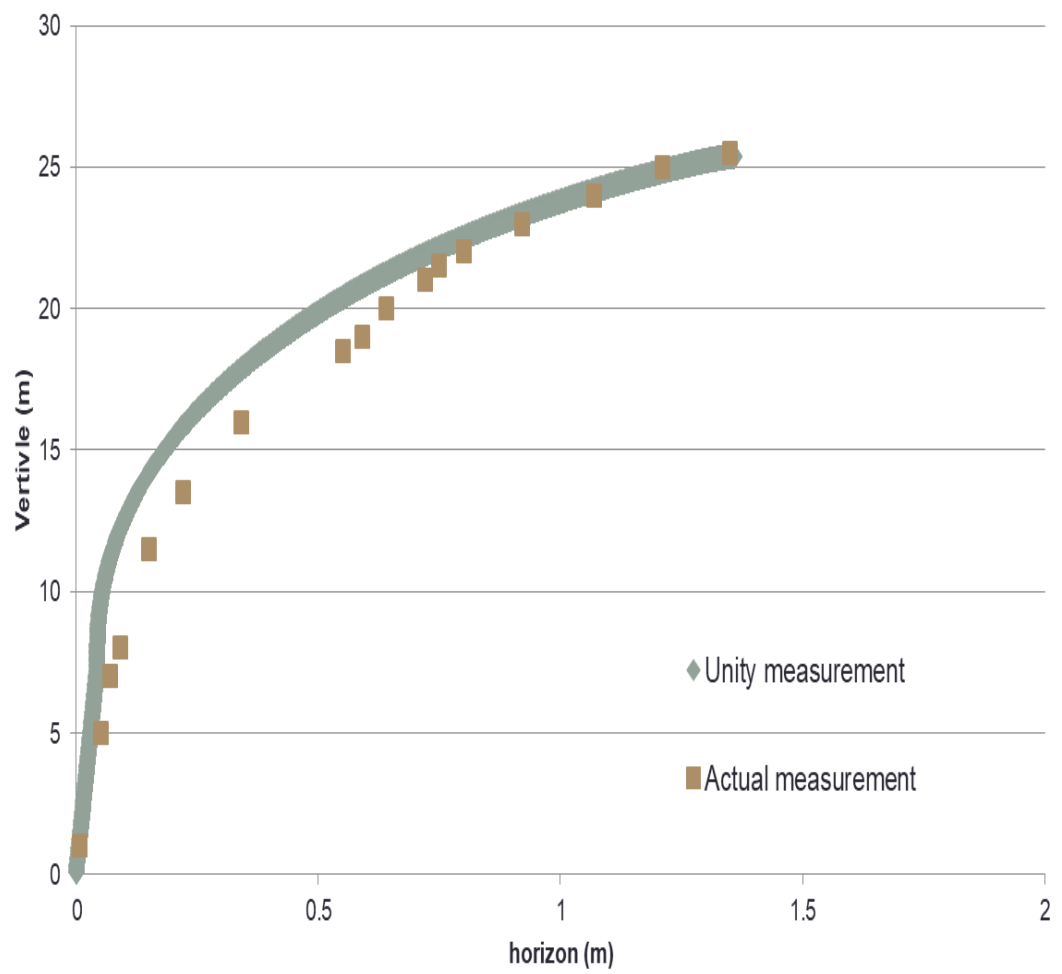


図5.1 ストーン軌跡比較

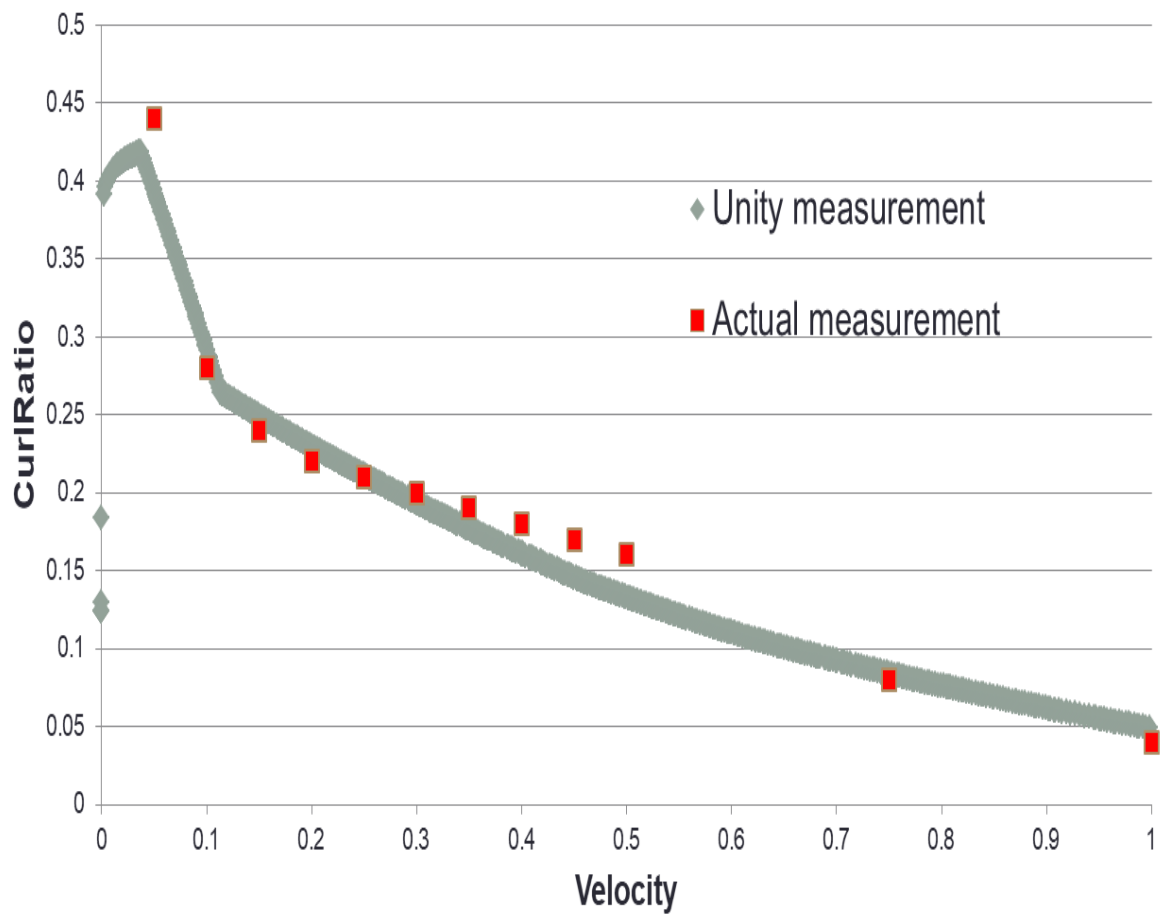


図5.2 カール幅比比較

各点でのカール幅比において、平均絶対パーセンテージ誤差 (MAPE)にて誤差率を算出。結果として約 8.46%という値が得られた。またストーンの軌跡に関しても実測値に近い結果が得られた。実測データではストーンが最終的にサイドライン方向へ1.35 m 移動したのに対し、この物理モデルでは約 1.36 m 程度移動し実測データに非常に近い値を得ることができた。

次に比較としてデジタルカーリングで用いられていたカール表現モデルによるカール幅比と軌跡を比較したものを以下に示す。

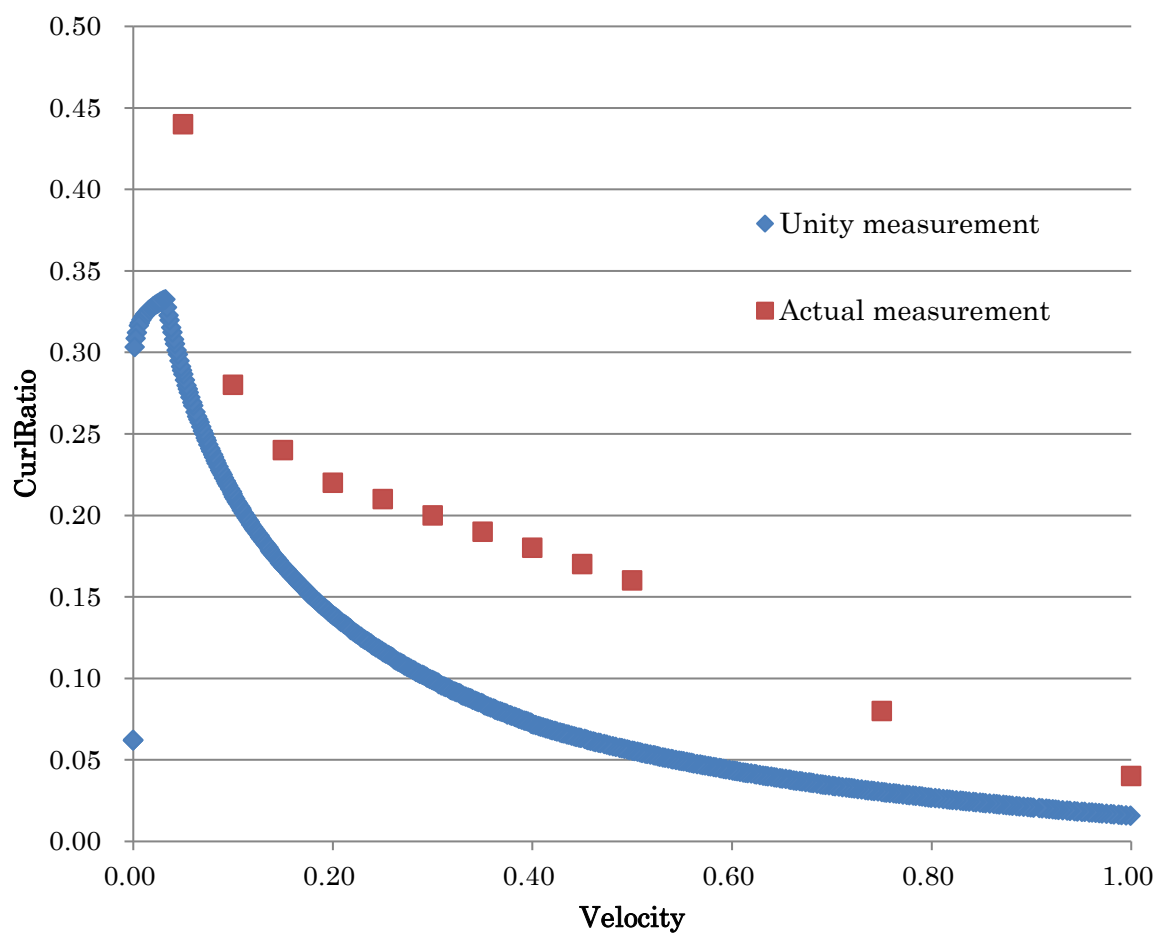


図5.3 デジタルカーリングシミュレーターによるカール幅比

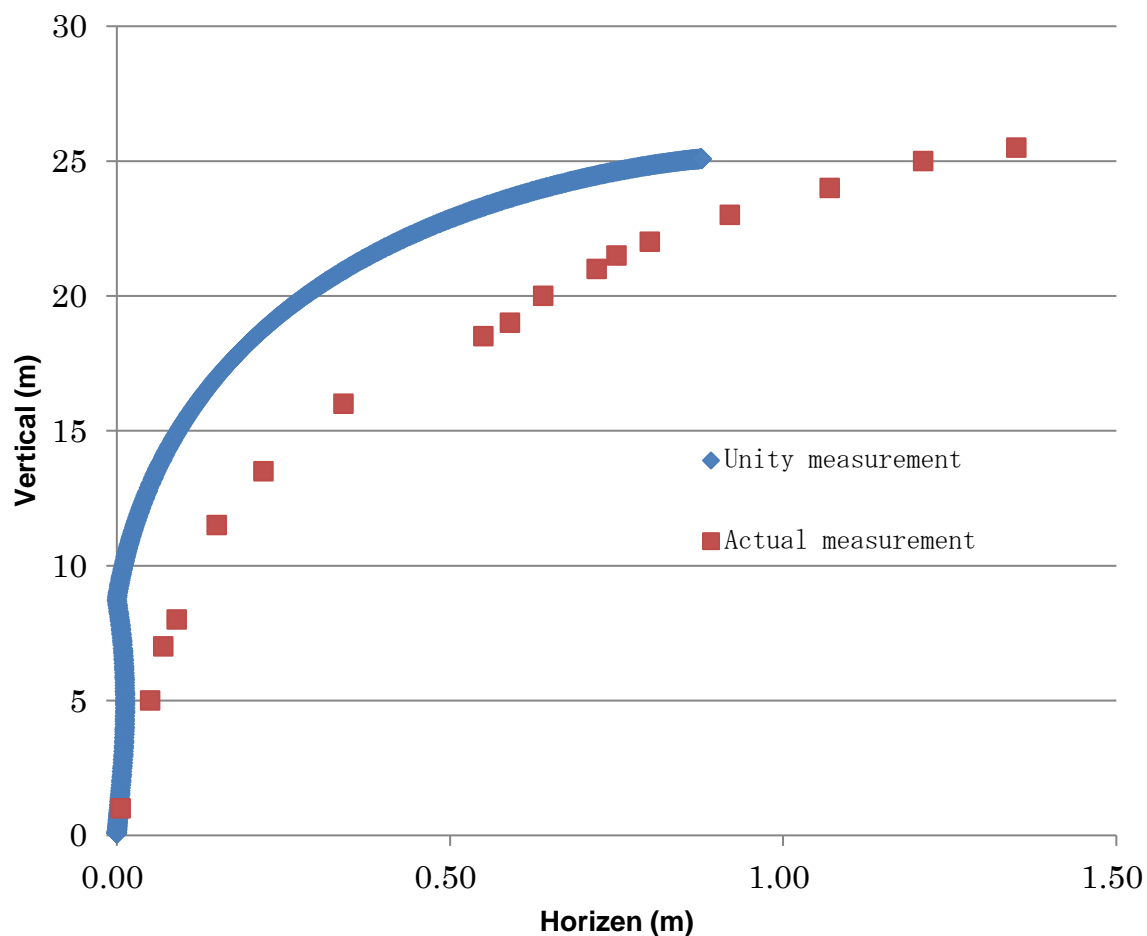


図5.4 デジタルカーリングシミュレーターによるストーン軌跡

この結果からカーリング選手が指摘していたカールが弱いという問題点が明確になった。実測データではストーンが最終的にサイドライン方向へ1.35 m 移動したのに対し、この物理モデルでは0.87 m 程度しか移動していなかった。またカーリング幅比の結果においても誤差率が約57.3%と実測データと乖離した結果が得られた。

## 5.4 考察

デジタルカーリングによるカール再現モデルでは図 5.3, 図 5.4 のようにカール幅比が実測値よりも低く、カールが弱いということが計測データからも確認できた。

現在最新の研究報告によればストーンのカール現象の主要因としてストーンのランニングバンドと呼ばれるリンクとの接触面の粗さとその面積が挙げられている。これまでカーリング場の氷面の状況がカールの最たる原因と考えられていたため、カール現象を再現す

るためのシミュレータを実装する際リンクの状態なども再現する必要があった。しかしこの研究結果によりカール現象をコンピュータ上で再現するにあたりストーンにのみ着目することでも正確なカール現象を表現することが可能となった。

本システムのカール再現モデルでは最新の研究報告の実測データを再現するように作製を行った。この実測データによって得られたカール再現モデル式においてカールを再現するためにストーンに加える力  $F$  がある時刻における速度に依存している。これは経験則的にカールの強さはストーンの速度に反比例していることが知られていたが、このシミュレーション結果でもそれを示すことができた。

一方で本システムにおけるカーリングストーンの底面が実際のカーリングストーンのように同心円状となっていない。そのためより精密なカールを表現するために物理演算用のモデルを同心円状のものへ変更し、ランニングバンドの表面粗さによるカール幅の変化に関する様々なデータを踏まえた上でモデルを改良していく必要がある。

## 第6章 システム体験者評価

### 6.1 実験手法

本研究では VR 機器による没入型デバイスを用いることで、カーリングを臨場感をもって体感することができるシステムの実現を目指す。この提案システムでは実環境にできる限り近づけるために、臨場感のある 3D カーリング場において、ストーンを滑らせたり、カーリング場の中を自由に移動できたりするようになっている。ここでは、このシステムの使用感を評価させ、本システムによってどれだけ実環境に近いカーリング場が実現できたかを検証することを目的とする。

カーリング経験者である北見工業大学カーリング部員である男女、5 名から 10 名程度を対象とする。カーリングの実環境の評価をさせるためには、カーリング経験者である必要がある。そのため、カーリング部員に協力を依頼する。

本システムは、実際のカーリング場の 3D データにもとづいてカーリングシートを表現し、ストーンの挙動も最新のストーンのカールを再現できるような物理モデルを用いて再現している。臨場感を高めるため、ストーンの衝突音やスイープの掛け声なども再現し、効果音や衝突エフェクトを付与している。またルールを逸脱するプレイをすると警告音が鳴り、注意喚起をする機能も持たせている。

実験では、このシステムを用いたコントローラの使い方について説明し、実際に CPU と 2 エンド性のショートゲームをプレイさせ、その後使用感について、「操作性」、「実環境再現性」、「ストーンの挙動の正確性」、「臨場感の高さ」の 4 項目について 5 段階のリッカート尺度で評価させる。また自由記述で良い点、悪い点、改善したほうが良い点について記述させる。

実験は、以下の手順で行う。(合計 1 時間程度以内)

- (1) 実験内容の説明と同意書への記入(約 10 分)
- (2) システムの使用説明と練習(約 5 分)
- (3) システムを使った CPU との対戦(約 15 分)
- (4) システムの評価およびアンケート(約 20 分)

実験中被験者が見ている動画や操作した様子は、PC 上の録画機能で録画して、システムの評価アンケート結果の分析や考察で用いる。



図 6.1 Oculus Rift S (オキュラス リフト エス)

仕様	Oculus Rift S
トラッキング方式	インサイドアウト方式(6DoF)
ディスプレイ	液晶
解像度	2560×1440
リフレッシュレート	80 Hz
視野角	110 度

表 6.1 仕様表

以下にアンケートの形式を示す.

アンケート

体験していただいた VR カーリングシステムに関して

5段階評価にて評価していただき, その評価の理由を簡単にお書きください.

## 操作性

—コントローラの扱いやすさやシステムの使いやすさ

悪い 1 2 3 4 5 良い

理由

## 実環境再現性

—カーリング場やリンクをどの程度 VR 空間内で再現できているか

低い 1 2 3 4 5 高い

理由

## ストーンの挙動の正確性

—ストーンのカーブなどが現実のものと比較してどの程度再現できているか

低い 1 2 3 4 5 高い

理由

## 没入感の高さ

—どの程度このカーリングシステムに入り込めたか

低い 1 2 3 4 5 高い



理由

## エフェクトによる効果

ーシステムのビジュアルエフェクトやサウンドエフェクトが，前述 4 つの項目に対してどの程度良い影響を寄与したか(例：盤面状況の確認がしやすくなったなど)

悪い					良い
1	2	3	4	5	

理由

## 自由記述

良い点，悪い点，改善したほうが良い点をご自由にお書きください。

以上のような構成となっている。

この実験の参加者として 6 名(男 1, 女 5)の協力を得ることができた。

実験の場所はアルゴグラフィックス北見カーリング場内の分析室内の一角にて実施した。

使用した PC のスペックは CPU：intel core i7 9700k GPU：nVidia RTX 2060 OS：Windows10 となっている。またカーリング日本代表の選手である平田洸介選手にも体験，評価してもらった。



图 6.2 VR 装着例

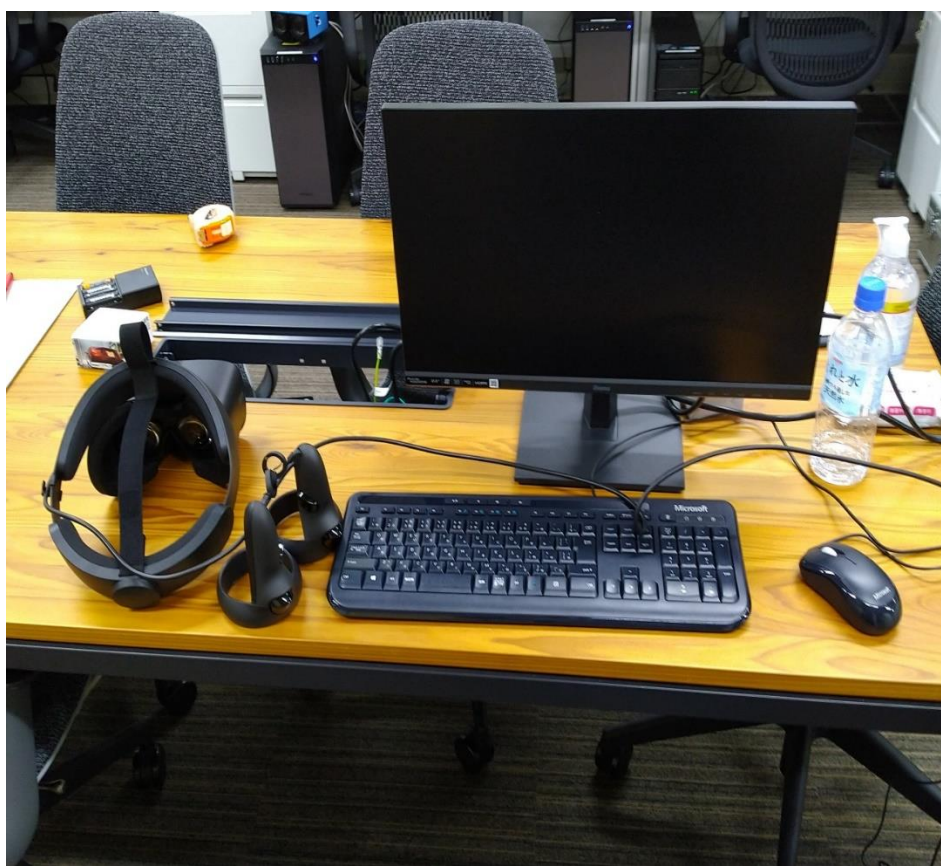


図 6.3 実験装置 1



図 6.4 実験装置 2



図 6.5 実験場所：アルゴグラフィックス北見カーリング場

## 6.2 結果

以下に実験結果をまとめた図を示す

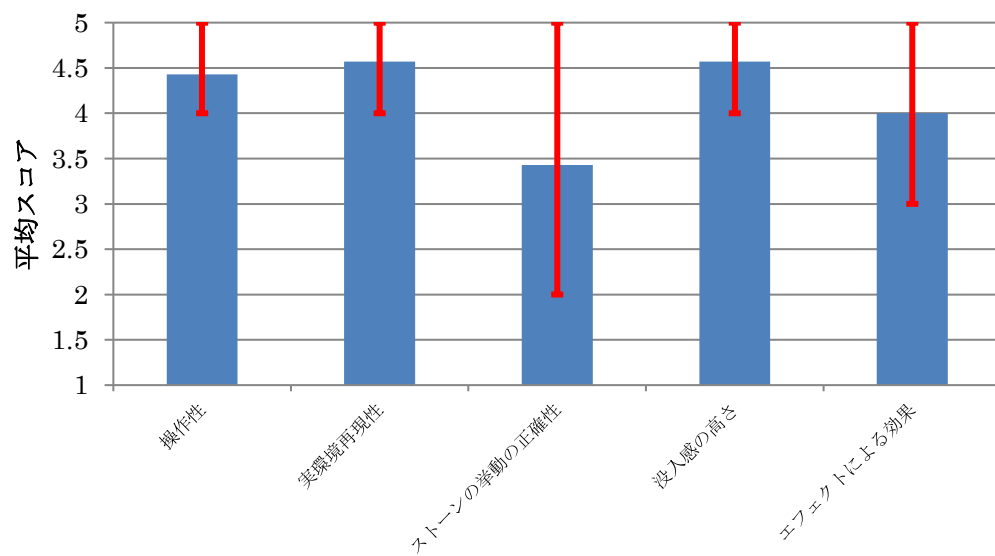


図 6.6 評価スコア範囲図

図 6.6 から本システムは全体的に高い評価を得ることが確認された。しかしストーンの挙動については評価が分かれる結果となった。次にこの数値評価の各項目の評価理由についてアンケートから抜粋して示す。

### 操作性について

評価理由

- 何をどうすれば良いかとても分かりやすかった。
- コントローラはとても扱いやすかった。
- 一部操作が面倒な場面があった。

### 実環境再現性について

評価理由

- 周囲の環境がとてもよく再現されていると感じた。
- 隣のラインにもカーリングの練習をしている人がいて面白かった。

### ストーンの挙動の正確性について

評価理由

- カールがよく再現できていると感じた。
- ウェイトに応じてカールが変化するのが現実に近い挙動だと感じた。
- 現実ではラインによってカール幅が変化するのに対して、このシステムではどのラインもカール幅が一定でそこが不自然だと感じた。
- ダブルテイクアウト時にストーンが異常に跳ねていた。
- 想像以上にカールした。

### 没入感の高さについて

評価理由

- 対戦相手(システムの CPU)の作戦がしっかりしていたのでのめり込めた。より戦略的になるとさらに楽しめると感じた。
- カーリング場を再現できていたので入りこめた。
- 視界が完全にカーリングそのものであった。
- 目標位置にデリバリーしても完全にその位置に決まることがほとんど無いのでそれを再現していたのが良かった。

### エフェクトによる効果について

評価理由

- 盤面状況を確認できるエフェクト(ショットロックなど)があって現実のカーリングよ

りも良かった。

- ストーンの挙動に関するサウンドエフェクトがあって再現度が高いと感じた。
- 衝突時のビジュアルエフェクトがカッコよかった。
- 運動量に応じて衝突音を無くしたりしたほうが良かったと感じた。

### 自由記述から

- ウェイトを3段階よりも更に多段階で変更できるようにして欲しい。
- 細かい石の動きがややぎこちないと感じた。(軽くぶつけた石が全く動かないなど)
- スウィープによってウェイトのコントロールできるのがとても楽しく、普段スキップをやっている自分がコールをかけたくなったほど楽しかった。
- このVRカーリングシステムを楽しめた。

評価点の理由についても全体的に好意的なものが多かった。しかしストーンの挙動に関しては細かなストーンの運動に関する指摘が散見された。特にストーンの衝突後の挙動について不自然さを感じたとの意見が多く出た。一方で、ストーンのカールについては再現度が高いとの評価が得られた。このストーンの衝突後の挙動について不自然さについての原因を考察にて述べる。

## 6.3 考察

アンケート結果よりストーンの挙動の正確性以外に関しては平均得点が4を超えるような高い評価を得ることができた。しかしストーンの挙動に関して評価が大きく分かれる結果となった。高評価とした方の理由としてカールに着目して、本システムのカールの再現度が高いことを挙げていた。一方で低評価の理由として、ストーンが衝突した際の挙動についてやや現実離れした動きになっていることを挙げていた。具体的には図6.7と図6.8のように連なったストーンにストーンをぶつける際にデリバリーしたストーンが想定よりも跳ね返りが大きかったことを挙げていた。

ただ平田選手はこの現象を含めてストーンの挙動についてとても良く再現されているという評価を下した。その理由として考えられるのはシステム中に発言した「このシステムのデリバリーの速度が世界トップレベルだ」ということから、その速度でぶつけた場合ならばあり得ると判断したと考えられる。

これらのことによりストーンの衝突挙動に関して、各個人のウェイトの基準により評価が分かれた要因と考えられる。本システムではウェイトが非常に大きく設定されており、通常の女子カーリング選手では出せないウェイトであった。また被験者の多くが女性であったため、男子のトッププロ選手並みの本システムのウェイトに対しての違和感から評価を落とした要因と考えられる。



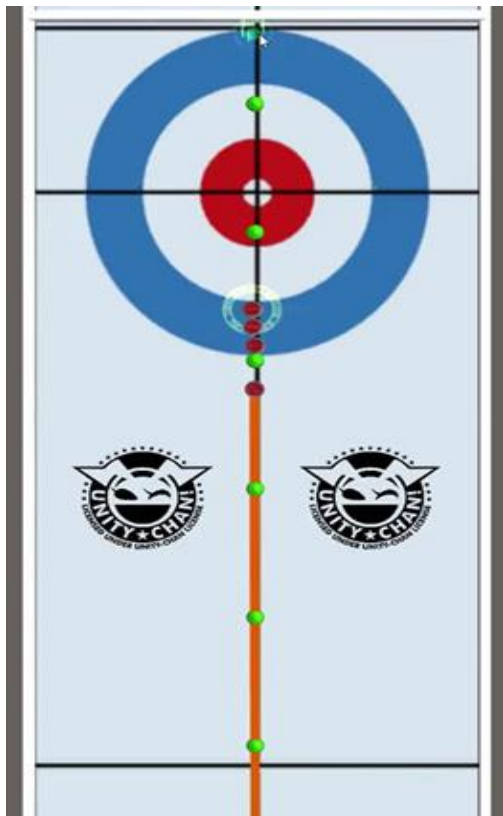


図 6.7 衝突前のストーン

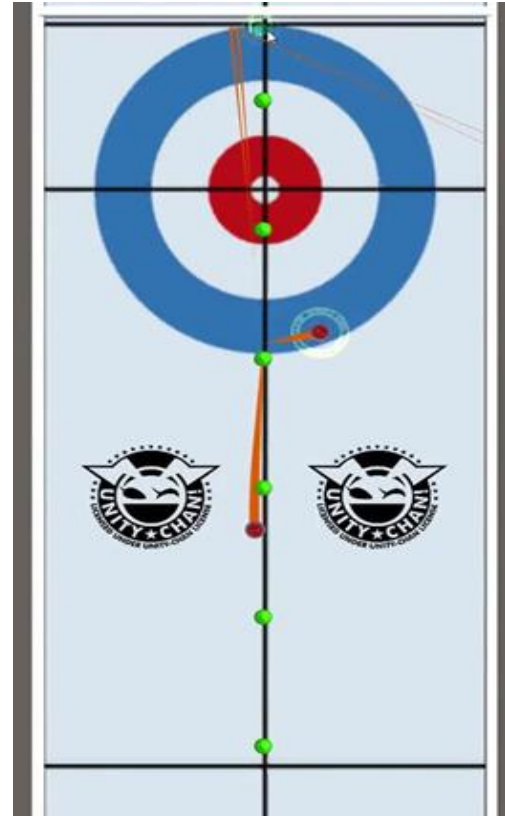


図 6.8 衝突後のストーンの挙動

実環境再現性や没入感の評価に関して、VR 装置と VR 空間内の 3D モデルによって集中して楽しめたという評価が得られた。これにより VR と精巧な 3D モデルの相乗効果により没入感と集中力向上に寄与したと考えられる。

またエフェクトによる効果について、見た目を艶やかにすることを目的とするビジュアルエフェクトと、盤面状況の理解補助を目的とするものについて両方好意的な評価を得ることができた。特に盤面状況の理解促進のエフェクトの中のショットロックの明確化のエフェクトは、現実のカーリングにも導入したいほどよかったとの意見があった。

一方でサウンドエフェクトについて、ストーン衝突音が運動量の小ささによっては無くてもよいのではないかという意見があった。エフェクトの評価がやや低下してしまった理由としてこれが原因ではないかと思われる。ただこのサウンドエフェクトについてもこれ以外は臨場感があってよいという評価があった。

操作性についてとてもわかりやすく、すぐに使いこなせるようになったという意見が多く占め、否定的な意見は存在しなかった。このことから操作性に関してはほぼ問題のないシステムであると考えられる。

以上のことから本システムの目標である実環境の再現において、カーリング経験者から高い評価を得ることができたため概ねこの目的を達成できたと考えられる。また没入感や操作性、エフェクトに関する事柄に関しても高い評価を得ることができた。そのためカー

リングの楽しさを本システムによって表現できたと言える。

今後の課題としてカールの挙動について各個人(男女差など)のウェイトの基準に左右されないように、本システムのウェイト調整機能をより細かくウェイトを選択できるように改修する必要がある。またカールについても現実的な挙動であるという評価を得ることができたが、一部デリバリーのラインを変えてもカール幅が変化しないことについて指摘していた。そのためより精密なカール再現モデルを実装するにあたり、今後計測されるデリバリー後のカール幅についての測定データを待ってからモデルを算出する必要がある。

本実験ではコロナウィルス感染防止により実験時間を極力少なくして行った。そのため当研究室で開発した戦略 AI 向けデジタルカーリングシステムとの比較を行っていない。ゆえに今後このデジタルカーリングとのカール幅比などの比較実験を行う必要がある。また本システムの機能であるエフェクトやカーリング場の 3D モデルの有無での評価実験を行い、エフェクトや精密な 3D モデルによってどの程度没入感や実環境再現性に寄与しているか検討を行いたい。これにより本システムの有用性などを図る。

今回の実験によりカーリング経験者から実環境に近い VR カーリングシステムであると評価された。そこで次に本システムの第二の目標である初心者や未経験者が楽しめるカーリングシステムの提案について、カーリング経験者および選手とは異なる視点で追加実験を行う方針である。この実験でカーリング未経験者に本システムを評価してもらい、どの程度カーリングに興味関心を抱いたか、カーリングのルールを理解度などを測定する。その結果を以て未経験者向けに関する本システムの評価を行う。



## 第7章 結論

カーリング経験者から実環境に近いVRカーリングシステムであると評価されたため、本システムの目標である実環境をどの程度再現できているかおよび、カーリングの楽しさを仮想空間上に表現することを達成することができた。しかしストーンの挙動に関しては評価が分かれる結果となってしまった。しかしこれは選手の想定したウェイトよりも強いウェイトでデリバリーを行うシステムであるため、これによりストーンの挙動に不自然さを感じさせてしまったと考えられる。元日本代表の選手のストーンの挙動の評価が高いことから窺える。

今回の実験ではいままでのデジタルカーリングシステムとの比較実験が行えていないため、今後このシステムとデジタルカーリングシステムとをカーリング経験者に比較してもらい評価実験を行うことで、本システムの有用性などを図る。更に追加実験として未経験者や初心者にも楽しめるカーリングシステムに関する評価を行っていく。これらにより本システムの改善を目指す。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，ご指導を頂いた指導教員の伊藤毅志先生に心から感謝致します．また実験にご協力いただいた北見工業大学関係者の皆様方にお礼申し上げます．

本研究は JSPS 科研費 18H03347 の助成を受けたものです．

## 参考文献

- 
- <sup>1</sup> 森健太郎, 伊藤毅志, 条件にロバストなデジタルカーリングの改良, 情報処理学会研究報, GI-41, No. 11 (2019)
- <sup>2</sup> 北清勇磨, 伊藤毅志, “カーリングの戦略を支援するシステムの提案と構築”, ゲームプログラミングワークショップ 2013 論文集, pp. 154-161 (2013).
- <sup>3</sup> 伊藤毅志, 森健太郎, 北清勇磨, “第1回 UEC 杯デジタルカーリング大会報告”, 情報処理学会ゲーム情報学研究会報告, GI-34(2), pp. 1-6 (2015).
- <sup>4</sup> 平昌冬季五輪の競技に関する調査, 産業能率大学 調査報告書(最終アクセス日, 2018. 3. 22.)[https://www.sanno.ac.jp/admin/research/gorin2018\\_3.html](https://www.sanno.ac.jp/admin/research/gorin2018_3.html)
- <sup>5</sup> 森 健太郎, 伊藤 毅志, "条件の変更にロバストなデジタルカーリングの改良", 情報処理学会ゲーム情報学研究会, GI-41(11), pp.1-8 (2019).
- <sup>6</sup> 鹿野大貴, 亀田貴雄, 佐渡公明, 氷上を進むストーンの運動の解析, 雪氷研究大会(2019・山形), pp. 1, (2019. 9. 8-9. 11).
- <sup>7</sup> 鹿野大貴, 亀田貴雄, 佐渡公明, 氷上を進むストーンの曲がり幅に対するストーンのランニングバンドの表面粗さ, 氷面, 角速度の影響, 雪氷研究大会(2019・山形), pp. 1, (2019. 9. 8-9. 11).
- <sup>8</sup> The importance of the surface roughness and running band area on the bottom of a stone for the curling phenomenon, Takao Kameda, Daiki Shikano, Yasuhiro Harada, Satoshi Yanagi, Kimiteru Sado, pp. 1-9, (Received: 4 July 2020; Accepted: 2 November 2020).
- <sup>9</sup> Learning Science in Immersive Virtual Reality, Jocelyn Parong and Richard E. Mayer, Journal of Educational Psychology, pp. 1-13, (January 25, 2018).
- <sup>10</sup> Development of a Multi-Sensory Virtual Reality Training Simulator for Airborne Firefighters Supervising Aerial Wildfire Suppression, Rory M.S. Clifford, Humayun Khan, Simon Hoermann, Mark Billingham, Robert W. Lindeman, pp. 1-5, (March 2018).
- <sup>11</sup> Effects of Virtual Reality and Non-Virtual Reality Exercises on the Exercise Capacity and Concentration of Users in a Ski Exergame: Comparative Study, Junho Ko, PhD; Seong-Wook Jang, PhD; Hyo Taek Lee, PhD; Han-Kyung Yun, PhD; Yoon Sang Kim, PhD, JMIR Serious Games, pp. 1-8, (2020;8(4):e16693)